CLIPPEDIMAGE= JP403213500A

PAT-NO: JP403213500A

DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 03213500 A

TITLE: GRAVITY-FREE SIMULATING DEVICE

PUBN-DATE: September 18, 1991

INVENTOR-INFORMATION:
NAME
IOI, KIYOSHI
NORO, OSAMU
MIKI, OSATAKE

ASSIGNEE-INFORMATION:

| NAME | COUNTRY |
|---|---|
| KAWASAKI HEAVY IND LTD | N/A |

APPL-NO: JP02009257

APPL-DATE: January 17, 1990

INT-CL (IPC): B64G007/00

US-CL-CURRENT: 244/158R

ABSTRACT:

PURPOSE: To facilitate production of the gravity-free state of an object by mounting a test piece on an active drive mechanism, having at least six degrees of freedom, through a sensor, and effecting feedback of the active drive mechanism so that a detecting force and torque are balanced with gravity of the test piece.

CONSTITUTION: An active drive mechanism 2, e.g. an industrial robot, is located on a ground 1, and a test piece 4 is mounted on the active drive mechanism 2 through a sensor 3 to detect a force and torque. The sensor 3 is arranged so

as to allow detection of the forces of X-Z-axes and torque around the X-Z-
axes. The active drive mechanism 2 is formed so that an object 4 can be
actively driven in orientation to roll, pitch, and yaw around each of X-Z-axes.
Feedback control is made on the active drive mechanism 2 so that a force and
torque detected by the sensor 3 are balanced with gravity of the test piece 4,
and feed forward control is effected according to the speed detecting value of
the test piece.

⑲日本国特許庁（JP）　⑪特許出願公開

⑫公開特許公報（A）　平3－213500

㊸公開　平成3年(1991)9月18日

| ⑤Int. Cl.⁵ | 識別記号 | 庁内整理番号 |
| --- | --- | --- |
| B 64 G 7/00 | A | 8817－3D |

審査請求　未請求　請求項の数 3（全10頁）

⑭発明の名称　無重力模擬装置

㉑特　願　平2－9257
㉒出　願　平2(1990)1月17日

⑫発明者　五百井　清　兵庫県明石市川崎町1番1号　川崎重工業株式会社明石工場内
⑫発明者　野呂　治　兵庫県明石市川崎町1番1号　川崎重工業株式会社明石工場内
⑫発明者　三木　修武　兵庫県明石市川崎町1番1号　川崎重工業株式会社明石工場内
⑪出願人　川崎重工業株式会社　兵庫県神戸市中央区東川崎町3丁目1番1号
⑭代理人　弁理士　西教　圭一郎　外1名

明細書

1、発明の名称

無重力模擬装置

2、特許請求の範囲

(1)被試験体を少なくとも6自由度で区分する能動駆動機構と、

被試験体の能動駆動機構との間に介在され、被試験体に作用する力およびトルクを検出するセンサと、

前記センサの出力に応答し、そのセンサによつて検出される力およびトルクが被試験体の重力と釣り合うように能動駆動機構をフイードバツク制御する手段とを含むことを特徴とする無重力模擬装置。

(2)前記制御手段は、動的外力補償を行うことを特徴とする特許請求の範囲第1項記載の無重力模擬装置。

(3)被試験体の速度を求める速度検出手段を備え、

前記制御手段は、速度検出手段の出力に応答してフイードフオワード制御することを特徴とする特許請求の範囲第1項記載の無重力模擬装置。

3、発明の詳細な説明

産業上の利用分野

本発明は、たとえば宇宙船のドツキングなどのように無重力状態での物体の衝突後の運動などを模擬することができるようにするための無重力模擬装置に関する。

従来の技術

宇宙空間での各種ミツシヨン作業に伴う動作の中には、捕捉結合動作をはじめとして、力学的に浮遊物体の接触、衝突現象とみなせる動作が数多く存在する。これらの接触、衝突を伴う作業が支障なく円滑に遂行されるように機器を設計、製作し、作業計画を立案するためには、着目する物体が接触、衝突時にどのような挙動をするかを出きる限り正確に知る必要がある。このための最も直接的で有効な方法は、地上において物体の宇宙空間における浮遊状態を再現することである。

従来、地上での再現実験には次のような手法が用いられてきたが、それぞれに以下のような問題

点があつた。空気浮上型や磁気浮上型の実験装置では、物体の運動が平面内運動に限られ、3次元空間運動を模擬できないという欠点があつた。

また、重力と浮力を釣り合わせた水中内実験では、水の抵抗や付加質量のために、物体の動特性が変化してしまうという問題点があつた。

さらに、単純に、6自由度運動機構(たとえば、ガーダとジンバル機構で構成された装置)に物体を取り付けるだけでは、その運動機構の質量特性が物体の運動に影響するため、物体そのものの運動を再現できないという問題点があつた。

また、計算機内部に物体の運動方程式モデルを有して、時々刻々その運動を数値計算し、物体を動かす手法は、計算機の負担が大きく、実時間シミユレーシヨンには不向きであるという難点があつた。

さらに、落下塔や航空機内で無重力環境をつくり出すのは、装置が大がかりで長い時間の運動の模擬には適していない。

発明が解決すべき課題



本発明の目的は、3次元での無重力状態を、実時間で容易に実現することができるようにした無重力模擬装置を提供することである。

課題を解決するための手段

本発明は、被試験体を少なくとも6自由度で区分する能動駆動機構と、

被試験体の能動駆動機構との間に介在され、被試験体に作用する力およびトルクを検出するセンサと、

前記センサの出力に応答し、そのセンサによつて検出される力およびトルクが被試験体の重力と釣り合うように能動駆動機構をフイードバツク制御する手段とを含むことを特徴とする無重力模擬装置である。

また本発明は、前記制御手段は、動的外力補償を行うことを特徴とする。

また本発明は、被試験体の速度を求める速度検出手段を備え、

前記制御手段は、速度検出手段の出力に応答してフイードフオワード制御することを特徴とする。



作　用

本発明に従えば、少なくとも能動6自由度運動機構(たとえば6自由度ロボツトアーム)の先に取り付けた物体の重力をキヤンセルし、かつ能動運動機構先端の等価慣性質量および等価慣性モーメントをできる限り小さくするように制御を加えて、取り付けた物体があたかも無重力空間を漂つているかのような運動を簡易的に実現する。

すなわち本発明の基本的考え方は、無重力運動を模擬させたい物体と能動6自由度運動機構先端の取り付け部との間に、力/トルクセンサを取り付け、そのセンサ力が常に被試験体の重力と釣り合うように、能動運動機構を制御するという考え方である。

実施例

第1図は、本発明の一実施例の簡略化した断面図である。大地1上には産業用ロボツトなどの能動駆動機構2が設けられ、この能動駆動機構2にはセンサ3を介して被試験体4が取り付けられる。センサ3は、被試験体4に作用する力およびトルクを検出する。重力加速度は参照符Gで示されている。

センサ3は、直交するX，YおよびZの各軸の力を検出し、またそれらのX，YおよびZの各軸まわりのトルクを検出する。6自由度の能動駆動機構2は、たとえばX，Y，Zの各軸の位置を取ることができ、またそれらの各軸まわりのロール、ピツチおよびヨーの姿勢を取つて、物体4を能動駆動することができる。

本発明の3次元における無重力模擬を行うための構成の理解を容易にするために、まず第2図を参照して、物体である被試験体4に関する1自由度運動機構を参照して、本発明の基本的な考え方を1自由度運動において説明する。物体4の質量をMp、能動1自由度運動機構2aの質量をMqとする。物体に作用する外力をFe、力センサ3を介して物体に作用する力を$F_r$、その反作用力を$(-F_r)$とする。また、能動1自由度運動機構2aを駆動する駆動力をτ、物体4の変位をxpとする。

1自由度運動における無重力運動とは、質量Mpの物体4が、外力Feに対してニュートン(Newton)の運動方程式、

$$Mp\cdot\ddot{x}p=Fe \quad \cdots(1)$$

(‥は時間の2階微分)

に従つて運動することである。

ところが、能動1自由度運動機構2aに取り付けられた物体4の運動方程式は、以下のようになつてしまう。

$$Mp\cdot\ddot{x}p=Fe+F_T \quad \cdots(2)$$

$$Mq\cdot\ddot{x}p=\tau-F_T \quad \cdots(3)$$

第2式および第3式を和して、

$$(Mp+Mq)\cdot\ddot{x}p=Fe+\tau \quad \cdots(4)$$

$\tau\equiv0$の場合が受動的な運動機構に取り付けただけの場合であり、その場合、質量は(Mp+Mq)に変わつてしまい、物体4そのものの質量Mpを表現していないことがわかる。

そこで、力センサ3の信号$F_T$を利用して、駆動力$\tau$を変化させ、駆動機構2aを能動的に動かせて、Mqの影響を極力、排除する制御系を構成



することを考える。すなわち能動駆動機構2aに入力する駆動力$\tau$を、第3図の制御補償器gdを介して

$$\tau=-gd\cdot F_T \quad \cdots(5)$$

と構成する。

第2式、第3式、第5式から、$\tau$と$F_T$を消去すると下式になる。

$$\left(Mp+\frac{Mq}{1+gd}\right)\cdot\ddot{x}p=Fe \quad \cdots(6)$$

第6式は、制御補償器gdのゲインが十分大きければ、第1式の運動を近似的に表現している。すなわちセンサ3の出力$F_T$をフイードバツク制御することで、1自由度運動機構2aの質量Mqをほとんど無視できるようにすることができる。特に、補償器gdの構成によつて、衝突の瞬間の応答を除いて、$F_T$を速やかにゼロ収束させることができれば、接触後の運動は、xp方向に物体4の無拘束(無重力)運動が達成されることになる。

このような制御補償器gdの構成の例として第



3図に示すP．I．I．D(比例、積分、積分、微分)型の補償器を考える。このとき、伝達関数表現で

$$gd(s)=s^1\cdot Kv+Kp+\frac{K_{I1}}{s}+\frac{K_{I2}}{s^2} \quad \cdots(7)$$

$$(Kv,\ Kp,\ K_{I1},\ K_{I2}\geqq0)$$

となる。この実際の構成図は、第3図に示されるとおりであつて、Kpは定数項5であり、$s^1$は微分器6であり、$K_{I1}$，$K_{I2}$およびKv1は定数項を掛算する係数器7，8，9を示しており、1／sは積分器10，11を示しており、また、減算器12および加算器13が備えられる。

第2式、第3式、第5式および第7式から、$\ddot{x}p$および$\tau$を消去して、Feから$F_T$への伝達関数G(s)を構成すると、

$$G(s)=\frac{Mg}{Mg+(1+gd)\cdot Mp}$$

$$=\frac{s^2\cdot Mg}{s^3\cdot MpKv+s^2\cdot[Mg+(1+Kp)\cdot Mp]+s^1\cdot K_{I1}\cdot Mp+K_{I2}\cdot Mp} \quad \cdots(8)$$

Mq，Mp＞0から、$K_{I2}=0$のとき、G(s)は安定な伝達関数となる。



また$K_{I2}>0$の場合も

$$[Mq+(1+Kp)\cdot Mp]\cdot K_{I1}\cdot Mp-MpK_v\cdot K_{I2}\cdot Mp>0 \quad \cdots(9)$$

にゲインパラメータを調整すれば、安定な3次遅れ系となる。このgdの構成は、P．I型、P．D型の構成を包含しており、これらは定数ゲインの対応する部分を0にするだけで実現できる。

以上で1自由度運動における物体の無拘束運動が実現できることがわかる。以下では物体4が空間内で無重力運動を模擬する構成についてのべる。

第4図は、無重力空間で物体に外力Feが作用する場合の模式図である。被試験物体4に固定された直交座標系を$\Sigma^p$とし、この座標系のベクトルおよびテンソル表現は、右上肩に添字pを付すものとする。また、能動6自由度運動機構のすえ付けられた固定座標系を$\Sigma^o$とし、この座標系のベクトルおよびテンソル表現は、右上肩に添字oを付すものとする。

無重力空間に物体が浮遊しており、この物体に外力Feが作用した場合、その運動は、ニュート

ン・オイラー（Newton－Euler)方程式から、以下のように表現される。d／dtは時間微分を表わす。

$$M_p\cdot\frac{dV_p}{dt}=F_e \quad \cdots(10)$$

$$\frac{d}{dt}(I_p\cdot\omega_p)=a_e\times F_e \quad \cdots(11)$$

ここで、$V_p$は物体の質量中心の並進速度ベクトル（$\in R^3$）、$\omega_p$は物体4の角速度ベクトル（$\in R^3$）、$M_p$は物体4の質量、$I_p$は物体4の慣性テンソル（3行3列）、$a_e$は物体の質量中心から外力作用点までのベクトル（$\in R^3$）である。

第10式および第11式は、任意の座標系で成立するベクトルの等式であるが、両辺を$\Sigma^o$系で表現してまとめると、行列・ベクトル表現を行つて、以下のようになる。

$$\begin{array}{l} 3\{ \\ 3\{ \end{array}\overset{\;3\qquad\quad 3}{\begin{bmatrix} M_p\cdot E & O \\ O & T_{op}I_p^p\end{bmatrix}}\overset{1}{\begin{bmatrix}\dot V_p^o\\ \dot\omega_p^p\end{bmatrix}}+\overset{1}{\begin{bmatrix}O\\ T_{op}(\omega_p^p\times(I_p^p\omega_p^p))\end{bmatrix}}=\overset{1}{\begin{bmatrix}F_e^o\\ a_e^o\times F_e^o\end{bmatrix}} \quad \cdots(12)$$



ただし、

$$\dot V_p^o\equiv\frac{d}{dT}[V_p^o] \quad \cdots(13)$$

$$\dot\omega_p^p\equiv\frac{d}{dt}[\omega_p^p] \quad \cdots(14)$$

を意味し、$T_{op}$は$\Sigma^p$系から$\Sigma^o$系への座標変換行列（直交3行3列）を示す（×はベクトルの外積記号である）。

すなわち、第12式で表わされる物体4の運動は、地上模擬試験で実現したい運動であり、第12式に近い運動を実現することが本発明によつて達成されるべき目標である。

さて、地上においてはこの被試験物体4を能動6自由度機構に取り付けて、試験を行わねばならない。第5図は、地上、すなわち重力場で、能動駆動機構2を介して吊り下げられた物体4に作用する外力を示す模式図である。この第5図において、説明する。

まず、能動6自由度機構2の運動を考える。能動6自由度機構2の被試験物体4の取り付け点から、被試験物体4に作用する力とモーメントをそ



れぞれ$F_T$, $N_T$（$\in R^3$）とすれば、能動6自由度運動機構の運動方程式は

$$I_q\cdot\ddot q+f_q(\dot q\cdot q)+G(q)=\tau+{}^tJ_q\cdot\begin{pmatrix}F_T^o\\ N_T^o\end{pmatrix} \quad \cdots(15)$$

となることが知られている。ここで、$I_q$は能動6自由度機構の慣性行列（6行6列）、$f_q(\dot q\cdot q)$はその遠心コリオリ力項（6次元ベクトル）、$G(q)$は重力項（6次元ベクトル）、$\tau$は能動6自由度機構の各駆動アクチュエータに入力される一般化力、${}^tJ_q$は能動6自由度機構の物体取り付け点の位置のヤコビ行列（Σ系の表示）の転置行列（6行6列）である。また、$q$, $\dot q$, $\ddot q$はそれぞれの能動アクチュエータの変位、速度、加速度を表し、6次元ベクトルである（ここで・は時間の1回微分、・・は時間の2回微分である）。

さらに、被試験物体4の方の運動方程式を考えると、第5図のように能動6自由度運動機構取り付け点から、外力、外モーメント$F_T$, $N_T$が作用するため、第12式とは異なつて以下のようになる。



$$\begin{array}{l} 3\{ \\ 3\{ \end{array}\overset{\;3\qquad\quad 3}{\begin{bmatrix} M_p\cdot E & O \\ O & T_{op}I_p^p\end{bmatrix}}\begin{bmatrix}\dot V_p^o\\ \dot\omega_p^p\end{bmatrix}+\overset{1}{\begin{bmatrix}O\\ T_{op}(\omega_p^p\times(I_p^p\omega_p^p))\end{bmatrix}}$$

$$=\overset{1}{\begin{bmatrix}F_e^o\\ a_e^o\times F_e^o\end{bmatrix}}\begin{array}{l}\}3\\ \}3\end{array}+\overset{1}{\begin{bmatrix}F_T^o\\ a_T^o\times F_T^o+N_T^o\end{bmatrix}}\begin{array}{l}\}3\\ \}3\end{array}+\overset{1}{\begin{bmatrix}M_p\cdot g^o\\ O\end{bmatrix}}\begin{array}{l}\}3\\ \}3\end{array} \quad \cdots(16)$$

ただし、上式において$a_T$は被試験物体の質量中心から能動駆動機構取り付け点までのベクトル、$g$は重力加速度ベクトルである。すなわち、能動駆動機構に取り付けられた被試験物体は、第15式と第16式に支配された運動を行うことにより無重力である第12式とは異なつた運動を行う。これは簡単な1自由度運動で説明したのと同様で、第1式の運動にはならず、第2式および第3式に支配された運動となることの空間運動への拡張となつている。さて第2式および第3式から第4式を導出したように、第15式および第16式を変形する。

第5図に示すように、被試験物体4と能動駆動機構2の取り付け点の並進速度を$V_T$, 取り付け

点の角速度を被試験物体4のそれと同じとすると、

$$V_T{}^0 = Vp^0 + \omega p^0 \times a_T{}^0 \qquad \cdots (17)$$

$$\omega_T{}^0 = \omega p^0 \qquad \cdots (18)$$

第17式および第18式を時間で1回微分して、加速度の関係を導くと、

$$\dot{V}_T{}^0 = \dot{V}p^0 + \dot{\omega}p^0 \times a_T{}^0 + \omega p^0 \times \dot{a}_T{}^0 \qquad \cdots (19)$$

$$\dot{\omega}_T{}^0 = \dot{\omega}p^0 \qquad \cdots (20)$$

ところで、能動6自由度機構2の各アクチユエータの変位速度 $\dot{q}$ と取り付け点の並進速度、角速度には当然関係があるから、

$$\left(\frac{V_T{}^0}{\omega_T{}^0}\right) = Jq \cdot \dot{q} \qquad \cdots (21)$$

ここで、Jqは能動6自由度機構のヤコビ行列で、第15式に現われた行列と同じものである。第21式の両辺を1回微分して加速度の関係を導くと、下のようになる。

$$\left(\frac{\dot{V}_T{}^0}{\dot{\omega}_T{}^0}\right) = Jq \cdot \ddot{q} + \dot{J}q \cdot \dot{q} \qquad \cdots (22)$$

被試験物体4の無重力運動を模擬する可動範囲内で、能動6自由度運動機構は、機構の特異点を



通らず、ヤコビ行列Jqは正則であるとする。このとき第22式から（−1は逆行列を表す）、

$$\ddot{q} = Jq^{-1}\left\{\left(\frac{\dot{V}_T{}^0}{\dot{\omega}_T}\right) - \dot{J}q \cdot \dot{q}\right\} \qquad \cdots (23)$$

第23式を第15式に代入して、第19式および第20式の関係から、$\dot{V}_T$ と $\dot{\omega}_T$ を $\dot{\omega}p$，$\dot{V}p$ で表現すると、以下のようになる。

$${}^tJq^{-1} \cdot Iq \cdot Jq^{-1}\left\{\left(\begin{array}{c|c} E & -A_0 \\ \hline O & E \end{array}\right) \cdot \left(\frac{\dot{V}p^0}{\dot{\omega}p^0}\right) + \left(\frac{\omega p^0 \times \dot{a}_T{}^0}{O}\right) - \dot{J}q \cdot \dot{q}\right\}$$

$$+ {}^tJq^{-1}\,(fq + Gq) = {}^tJ^{-1} \cdot \tau + \left(\frac{F_T{}^0}{N_T{}^0}\right) \qquad \cdots (24)$$

ただし、ここで

$$A_0 \equiv \begin{pmatrix} 0 & -a_{TZ} & a_{TY} \\ a_{TZ} & 0 & -a_{TX} \\ -a_{TY} & a_{TX} & 0 \end{pmatrix} \qquad \cdots (25)$$

$$a_T{}^0 \equiv \begin{pmatrix} a_{TX} \\ a_{TY} \\ a_{TZ} \end{pmatrix} \qquad \cdots (26)$$

とした。またEは3行3列の単位行列である。

また、第16式の［$R_T{}^0 \times$］の部分も $A_0$ を使



つて表現し直すと、

$$\left[\begin{array}{c|c} MpE & O \\ \hline O & Top\,Ip^p \end{array}\right]\left[\frac{\dot{V}p^0}{\dot{\omega}p^p}\right] + \left[\frac{O}{Top\,(\omega p^p \times (Ip^p \omega p^p))}\right]$$

$$= \left[\frac{Fe^0}{ae^0 \times Fe^0}\right] + \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right) \cdot \left(\frac{F_T{}^0}{N_T{}^0}\right) + \left(\frac{Mp \cdot g^0}{O}\right) \qquad \cdots (27)$$

第24式および第27式から、$F_T$，$N_T$ を消去すると（ただし、${}^tA_0 = -A_0$）、

$$\left\{\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right) {}^tJq^{-1}\, Iq\, Jq^{-1} \cdot {}^t\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right)\right\}\left(\frac{\dot{V}p^0}{\dot{\omega}p^0}\right) - \left(\begin{array}{c|c} MpE & O \\ \hline O & Top\,Ip^p \end{array}\right) \cdot \left(\frac{\dot{V}p^0}{\dot{\omega}p^p}\right)$$

$$+ \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right) \cdot {}^tJq^{-1} \cdot Iq\,Jq^{-1} \cdot \left\{\left(\frac{\omega p^0 \times \dot{a}_T{}^0}{O}\right) - \dot{J}q \cdot \dot{q}\right\} - \left(\frac{O}{Top(\omega p^p \times (Ip^p \omega p^p))}\right)$$

$$+ \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right) \cdot {}^tJq^{-1}\,(fq + Gq) + \left(\frac{Mq \cdot g^0}{O}\right)$$

$$= \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right) \cdot {}^tJq^{-1} \cdot \tau - \left(\frac{Fe^0}{ae^0 \times Fe^0}\right) \qquad \cdots (28)$$

すなわち、この第28式が、能動6自由度機構に被試験物体4が取り付けられ、能動6自由度機構2の各アクチユエータに入力 $\tau$ が作用し、さらに、被試験物体4に外力Feが作用する場合の運動方程式であり、簡単な1自由度機構の第4式に



対応するものである。

この第28式が、第12式と全く同じ式を表わすように、各アクチユエータの入力 $\tau$ を決めれば、被試験物体4は無重力運動を実現できたことになる。

第6図は、6自由度能動駆動機構2の各軸変位情報とその先端に設けられた力／トルクセンサ3の情報を利用した無重力運動を模擬するシミユレータのブロツク図である。この第6図において、6行6列の対角制御補償器15と、6行6列の積演算回路16，17，18と、6行6列転置ヤコビ行列の積演算回路19および6行6列転置ヤコビ行列の積演算回路20と、加算回路21，22，23とが備えられる。

第12式と第28式を比較して、両式が等しくなる条件は、下の等式となる。

$$\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right) \cdot {}^tJq^{-1} \cdot Iq \cdot Jq^{-1} \cdot {}^t\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right) \cdot \left(\frac{\dot{V}p^0}{\dot{\omega}p^0}\right)$$

$$+ \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right) \cdot {}^tJq^{-1} \cdot Iq \cdot Jq^{-1} \cdot \left\{\left(\frac{\omega p^0 \times \dot{a}_T{}^0}{O}\right) - \dot{J}q \cdot \dot{q}\right\}$$

$$+\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right)\cdot{}^tJq^{-1}\cdot(fq+Gq)+\left(\begin{array}{c} Mq\cdot g^0 \\ \hline O \end{array}\right)$$

$$=\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right)\cdot{}^tJq^{-1}\cdot\tau \qquad \cdots(29)$$

第２９式を簡単化して、

$$\tau=Iq\cdot Jq^{-1}\cdot{}^t\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right)\left(\begin{array}{c} \dot{V}p^0 \\ \hline \omega p^0 \end{array}\right)+IqJq^{-1}\left\{\left(\begin{array}{c} \omega p^0\times\dot{a}_\tau{}^0 \\ \hline O \end{array}\right)-\dot{J}q\cdot\dot{q}\right\}+fq$$

$$+{}^tJq\cdot\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right)^{-1}\cdot\left(\begin{array}{c} Mq\cdot g^0 \\ \hline O \end{array}\right)+Gq \qquad \cdots(30)$$

したがつて能動６自由度駆動機構の出力$\tau$を静的力$\tau s$および動的力$\tau_D$の和（$\tau=\tau s+\tau_D$）として、

$$\tau s={}^tJq\cdot\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline -A_0 & E \end{array}\right)\cdot\left(\begin{array}{c} Mq\cdot g^0 \\ \hline O \end{array}\right)+Gq \qquad \cdots(31)$$

$$\tau_D=Iq\cdot Jq^{-1}\cdot{}^t\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right)\left(\begin{array}{c} \dot{V}p^0 \\ \hline \omega p^0 \end{array}\right)+IqJq^{-1}\left\{\left(\begin{array}{c} \omega p^0\times\dot{a}_\tau{}^0 \\ \hline O \end{array}\right)-\dot{J}q\cdot\dot{q}\right\}+fq$$

ただし、第３１式において

$$\begin{pmatrix} E & O \\ A_0 & E \end{pmatrix}^{-1}=\begin{pmatrix} E & O \\ -A_0 & E \end{pmatrix} \qquad \cdots(33)$$

を利用した。



すなわち、第３１式の静的力$\tau s$と動的力$\tau_D$を理想的に入力できれば、第２８式の運動は、目標とする第１２式の運動を実現することになる。しかしながら、上記入力の動的力$\tau_D$は加速度を含む動的フイードフオワード項となるため、その実現は難しい。

そこで、静的力$\tau s$はフイードフオワード計算で補償し、動的力$\tau_D$は力検出器（力／トルセンサ）３からフイードバツク補償で補償する手法を提案する。

第７図は、この第６図における無重力運動シミユレータの構成図においてさらに非線型速度のフイードフオワード５を追加した実施例を示すブロツク図である。６行６列ヤコビ行列の時間積分の積演算回路２５と、６行６列逆ヤコビ行列の積演算回路２６と、６行６列慣性行列の積演算回路２７と、加算回路２８，２９とが備えられる。

$\tau_D$を以下のように構成する。

$$\tau_D=G_F\cdot\left\{\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right)\cdot\left(\begin{array}{c} F_\tau{}^0 \\ \hline N_\tau{}^0 \end{array}\right)+\left(\begin{array}{c} Mp\cdot g^0 \\ \hline O \end{array}\right)\right\} \qquad \cdots(34)$$



第３４式において、$F_\tau$，$N_\tau$は能動６自由度駆動機構２と被試験物体４の取り付け部に装備された力／トルクセンサ３から検出可能とし、また$G_F$は制御用補償器（６行６列）である。

ところで、この第３４式は第１６式の等式を考えると、以下のように表現できる。

$$\tau_D=G_F\left\{\left[\begin{array}{c|c} MpE & O \\ \hline O & Top\,Ip^p \end{array}\right]\cdot\left[\begin{array}{c} \dot{V}p^0 \\ \hline \omega p^p \end{array}\right]\right.$$

$$\left.+\left[\begin{array}{c} O \\ \hline Top(\omega p^p\times(Ip^p\omega p^p)) \end{array}\right]-\left[\begin{array}{c} Fe^0 \\ \hline ae^0\times Fe^0 \end{array}\right]\right\} \qquad \cdots(35)$$

したがつて、第３１式の静的力$\tau s$と第３４式の動的フイードバツク$\tau_D$を適用した場合、第３１式と第３５式を第２８式に代入した式が、被試験体を支配する方程式となる。第３１式および第３５式を第２８式に代入して、$\tau$を消去して以下の式が導かれる。

$$\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right)\cdot{}^tJq^{-1}\cdot Iq\cdot Jq^{-1}\cdot{}^t\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right)\cdot\left(\begin{array}{c} \dot{V}p^0 \\ \hline \omega p^0 \end{array}\right)$$

$$+\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right)\cdot{}^tJq^{-1}\cdot\left[Iq\cdot Jq^{-1}\cdot\left\{\left(\begin{array}{c} \omega p^0\times\dot{a}_\tau{}^0 \\ \hline O \end{array}\right)-\dot{J}q\cdot\dot{q}\right\}+fq\right]$$



$$=\left[\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline O & E \end{array}\right)+\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right){}^tJq^{-1}\cdot G_F\right]$$

$$\cdot\left\{\left[\left(\begin{array}{c|c} MpE & O \\ \hline O & Top\,Ip^p \end{array}\right]\cdot\left(\begin{array}{c} \dot{V}p^0 \\ \hline \omega p^p \end{array}\right)\right.$$

$$\left.+\left(\begin{array}{c} O \\ \hline Top(\omega p^p\times(Ip^p\omega p^p)) \end{array}\right)-\left(\begin{array}{c} Fe^0 \\ \hline ae^0\times Fe^0 \end{array}\right)\right\} \qquad \cdots(36)$$

第３６式は、簡単な１自由度の場合の第６式に対応しており、制御補償器$G_F$のゲインが十分大きければ、第３６式の左辺は相対的に影響が少なくなり、第１２式の運動に漸近することになる。

制御補償器$G_F$の代りに、以下の式で新しく制御補償器$G_D$（６×６）を定義する。

$$G_D\equiv\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_0 & E \end{array}\right)\cdot{}^tJq^{-1}\cdot G_F \qquad \cdots(37)$$

このとき$G_F$の$G_D$に対する関係は、

$$G_F={}^tJq\cdot\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline -A_0 & E \end{array}\right)\cdot G_D \qquad \cdots(38)$$

$G_D$は６行６列の補償要素であるが、その最も簡単な構成は、第７式のように、対角成分だけに、Ｐ．Ｉ．Ｉ．Ｄ型の補償器で構成すれば良い。さらには$G_D$の非対角成分にも補償要素を入れて、

さらに特性の良い補償器$G_D$を構成することも可能である。

第３１式と第３４式に基づいた前述の第６図のコントローラの構成において、図中の

$$\begin{bmatrix} E & O \\ A_0 & E \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E & O \\ -A_0 & E \end{bmatrix} \text{（6行6列）} \qquad \cdots (39)$$

は被試験体の質量中心と、能動６自由度運動機構の取り付け点の位置だけで決定される定数行列である。${}^tJq$ は能動６自由度運動機構の転置ヤコビ行列のため、時々刻々行列の成分が変化するため、マイクロコンピュータで演算、更新を行う。第６図の破線部１４が、第３１式の$\tau s$と第３４式の$\tau_D$を使つた基本構成である。

次に、さらに進んだ構成の例を与える。これは能動６自由度運動機構の速度$\dot{q}$も検出可能の場合か、あるいは$q$から疑似微分$\hat{\dot{q}}$を生成して$\dot{q}$を情報として使用できる場合に有効な手法である。$\dot{q}$が検出できることから、新しく入力$\tau_F$として、以下の入力を加える。



$$\tau_F = Iq \cdot Jq^{-1} \cdot \{ \begin{pmatrix} \omega p^0 \times \dot{a}_T{}^0 \\ O \end{pmatrix} - \dot{J}q \cdot \dot{q} \} + fq(q, \dot{q}) \qquad \cdots (40)$$

すなわち、能動６自由度運動機構の入力$\tau$として、

$$\tau = \tau s + \tau_D + \tau_F \qquad \cdots (41)$$

を考える。この補償を行つた場合、第３６式左辺の速度に関する項がなくなつて、以下のようになる。

$$\begin{pmatrix} E & O \\ A_0 & E \end{pmatrix} \cdot {}^tJq^{-1} \cdot Iq \cdot Jq^{-1} \cdot {}^t\begin{pmatrix} E & O \\ A_0 & E \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{V}p^0 \\ \omega p^0 \end{pmatrix}$$

$$= [ \begin{pmatrix} E & O \\ O & E \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E & O \\ A_0 & E \end{pmatrix} {}^tJq^{-1} \cdot G_F ]$$

$$\times [ \begin{matrix} MpE & O \\ O & Top\, Ip^p \end{matrix} ] \cdot \begin{pmatrix} \dot{V}p^0 \\ \omega p^p \end{pmatrix}$$

$$+ \begin{pmatrix} O \\ Top(\omega p^p \times (Ip^p \omega p^p)) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Fe^0 \\ ae^0 \times Fe^0 \end{pmatrix} \} \qquad \cdots (42)$$

$\tau_F$は非線型速度のフイードフオワード項を追加することに対応しており、応答はすぐれたものになるが、逆ヤコビ行列の演算（$Jq^{-1}$）や、能動６自由度運動機構の慣性行列$Iq$の計算等の演算の負担が増える。しかしながら、マイクロコン



ピユータを増設すれば十分可能で、その構成図を、前述の第７図に示す。

以上、被試験物体の無重力運動を模擬するために、能動６自由度運動機構に取り付け、その取り付け点の力／トルクをフイードバツク制御することで無重力運動模擬装置を構成することができる。この発明では、能動駆動機構の変位と力検出器の力／トルクだけを利用する構成と、さらに能動駆動機構の速度情報も利用する構成がある。

発明の効果

以上のように本発明によれば、少なくとも６自由度を有するロボツトなどのような能動駆動機構に、力およびトルクを検出するセンサを介して被試験体を取り付け、このセンサによつて検出される力およびトルクが被試験体の重力と釣り合うように能動駆動機構をフイードバツクするようにしたので、３次元で物体の無重力状態を比較的容易にかつ実時間で実現することが可能である。

さらにまた本発明によれば、制御手段は動的外力補償を行い、さらにまた被試験体の速度を検出



し、その速度検出手段の出力に基づいてフイードフオワード制御を行うようにし、これによつて高精度の無重力状態を実現することが可能となる。

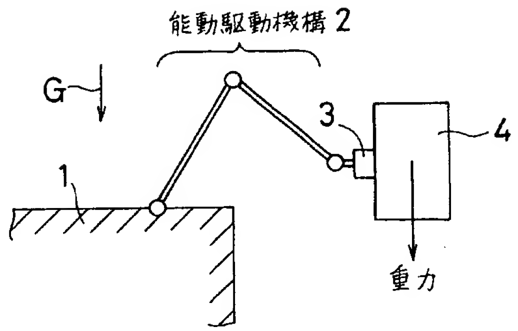
４、図面の簡単な説明

第１図は本発明の一実施例の無重力模擬装置の概要を示す断面図、第２図は物体４が取り付けられた１自由度運動機構２ａを示す図、第３図は補償器ｇｄの構成を示すブロツク図、第４図は無重力空間で物体に外力Ｆｅが作用する場合の模式図、第５図は地上の重力場で能動駆動機構２を介して吊り下げられた物体４に作用する外力を示す模式図、第６図は６自由度能動駆動機構２の各軸変位情報とセンサ３の情報とを利用した無重力運動模擬装置の構成を示すブロツク図、第７図は本発明の他の実施例における非線型速度のフイードフオワード項を追加した構成を示すブロツク図である。

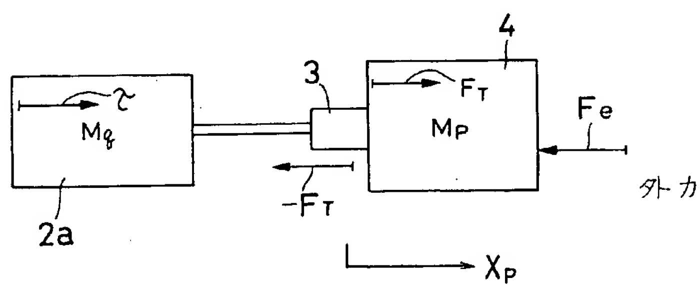
１…大地、２，２ａ…能動駆動機構、３…センサ、４…重力

代理人　弁理士　西教　圭一郎

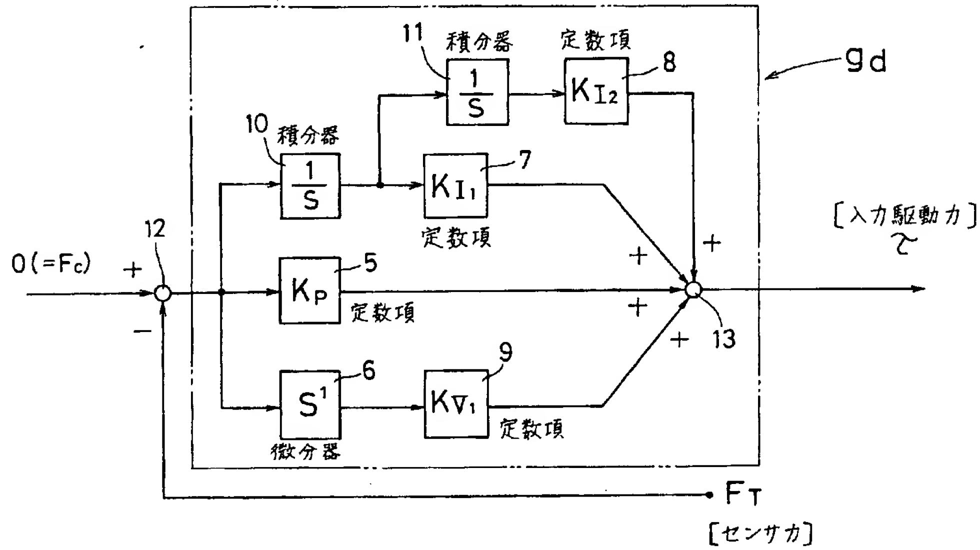
第 1 図


能動駆動機構 2
G
1
3
4
重力

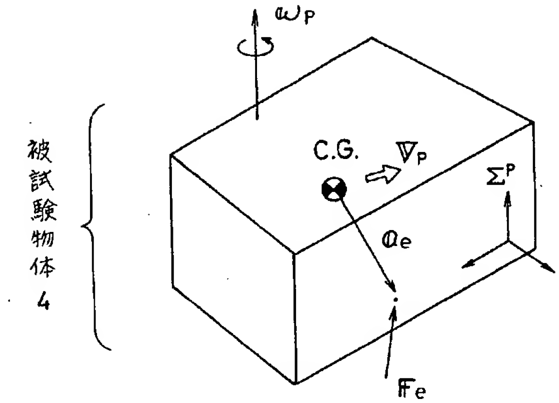
第 2 図


4
3
τ
Mq
FT
MP
Fe
外力
-FT
2a
XP

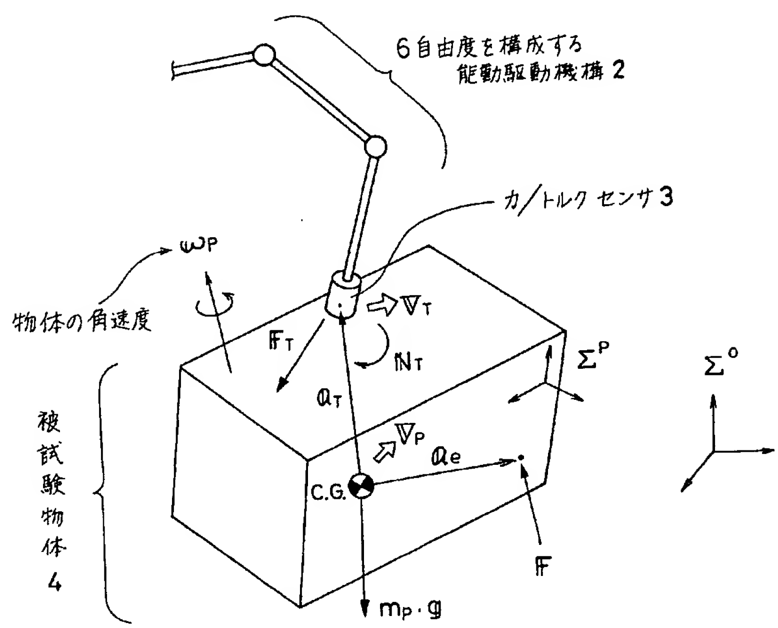
第 3 図


11 積分器
定数項
8
1/S
KI2
9d
10 積分器
1/S
KI1
7
定数項
12
[入力駆動力]
τ
0(=Fc)
+
−
KP
5
定数項
+
+
+
+
13
S1
6
9
KV1
定数項
微分器
FT
[センサカ]

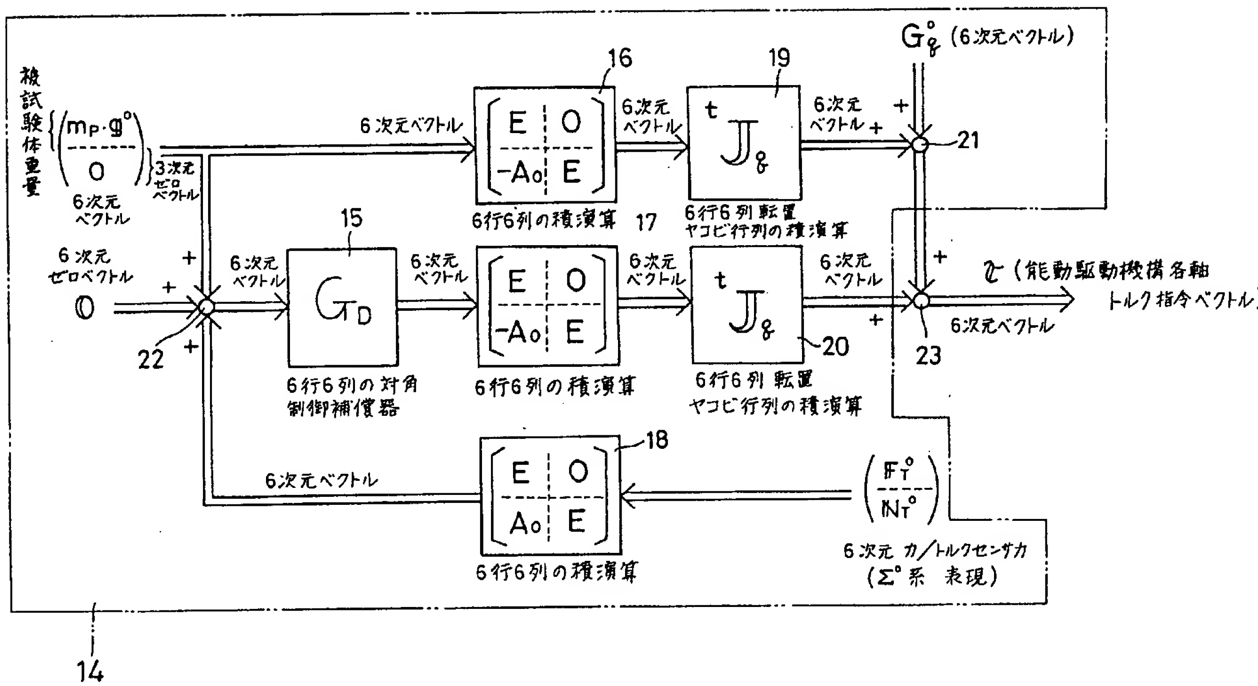
第 4 図


ωP
C.G.
VP
ΣP
ae
Fe
被試験物体4

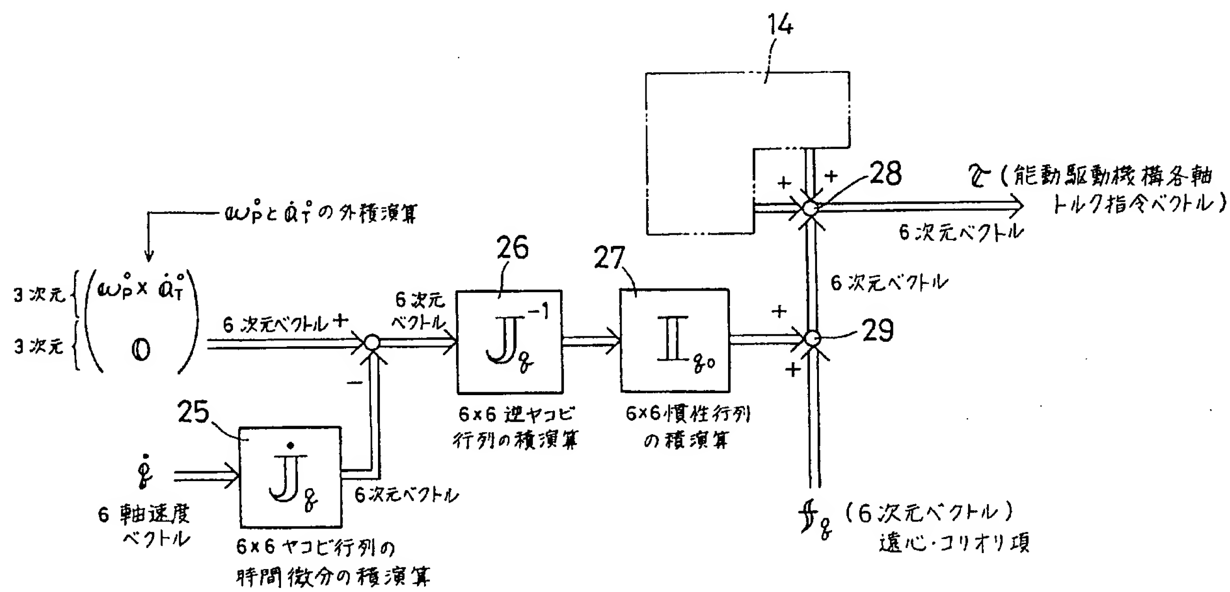
第 5 図


6自由度を構成する能動駆動機構 2
カ/トルク センサ 3
ωP
物体の角速度
VT
FT
NT
aT
ΣP
Σ0
VP
ae
C.G.
F
mP・g
被試験物体4

第 6 図


被試験体重量
6次元ベクトル
3次元ゼロベクトル
6次元ゼロベクトル
6次元ベクトル
16
19
6次元ベクトル
6行6列の積演算
17
6行6列転置ヤコビ行列の積演算
15
$G_D$
6行6列の対角制御補償器
6行6列の積演算
6行6列転置ヤコビ行列の積演算
20
21
22
23
$G_g^o$ (6次元ベクトル)
τ (能動駆動機構各軸トルク指令ベクトル)
6次元ベクトル
18
6次元ベクトル
6行6列の積演算
6次元力/トルクセンサ力
($\Sigma^o$系 表現)
14

第 7 図


14
28
τ (能動駆動機構各軸トルク指令ベクトル)
6次元ベクトル
$\omega_P^o$と$\dot{a}_T^o$の外積演算
26
27
3次元
3次元
6次元ベクトル
6次元ベクトル
29
6×6 逆ヤコビ行列の積演算
6×6慣性行列の積演算
25
$\dot{q}$
6軸速度ベクトル
6次元ベクトル
6×6 ヤコビ行列の時間微分の積演算
$f_g$ (6次元ベクトル) 遠心・コリオリ項